SISTEM DE ACHIZIȚIE A SEMNALELOR CU REPLICAREA ACESTORA LA DISTANȚĂ

Șef lucr. univ. dr. ing. Laura Mihaela LELUȚIU, Student ing. Andrei-Cristian SPĂTARU

Universitatea „Transilvania” din Braşov, Braşov, România

REZUMAT. Lucrarea propune o arhitectură integrată pentru achiziția și transmisia wireless a semnalelor analogice și digitale, fundamentată pe microcontrolere din familia ESP și pe interfețe de comunicație de înaltă performanță. Structura sistemului urmărește optimizarea fluxului de date între convertoarele analog-digitale și mediul de rețea, printr-o implementare hibridă ce combină magistralele SPI și I²C cu un protocol de transport UDP configurat pentru latență minimă. Substratul software este construit în framework FreeRTOS, asigurând o distribuție eficientă a sarcinilor și o sincronizare precisă a proceselor de achiziție și transmisie. Rezultatele experimentale indică o stabilitate remarcabilă a conexiunii wireless și o fidelitate ridicată a semnalului reconstruit, confirmând viabilitatea modelului propus pentru aplicații în domeniile măsurărilor industriale, sistemelor ciber-fizice și rețelelor de senzori distribuite. Analiza de performanță evidențiază, de asemenea, un echilibru optim între complexitatea implementării și eficiența energetică, aspect esențial pentru integrarea în dispozitive portabile și sisteme embedded autonome.

Cuvinte chele: achiziție de date, microcontrolere ESP, SPI, UDP, FreeRTOS, latență redusă, sisteme ciber-fizice, senzori wireless

ABSTRACT. An integrated architecture for wireless acquisition and transmission of analog and digital signals is presented, based on ESP-family microcontrollers and high-performance communication interfaces. The system optimizes data flow between analog-to-digital converters and the network layer through a hybrid design combining SPI and I²C buses with a low-latency UDP protocol. Implemented on the FreeRTOS framework, the solution ensures efficient task management and precise process synchronization. Experimental results demonstrate stable wireless communication and high signal fidelity, validating the model's applicability to industrial measurements, cyber-physical systems, and distributed sensor networks. The design achieves a balanced trade-off between implementation complexity and energy efficiency, enabling deployment in portable and autonomous embedded systems.

Keywords: : data acquisition, ESP microcontrollers, SPI, UDP, FreeRTOS, low latency, embedded systems, wireless sensors

1. INTRODUCERE

Evoluția tehnologiilor digitale și a comunicațiilor fără fir a condus la o convergență între sistemele de măsurare, control și procesare a datelor. În contextul industrial și al aplicațiilor moderne de monitorizare, se impune necesitatea unor sisteme capabile să preia și să transmită informații analogice și digitale în timp real, cu fidelitate ridicată și latență minimă. Achiziția de date devine astfel un proces esențial în infrastructurile inteligente și în dezvoltarea sistemelor ciber-fizice [1].

Microcontrolerele moderne, servesc a fi o platformă versatilă pentru implementarea unor soluții integrate de achiziție și transmisie de semnale. Acestea dispun de cele mai multe ori de interfețe de viteză ridicată și conectivitate wireless nativă, permițând interacțiunea directă cu convertoare analog-digitale (ADC) și digitale-analogice (DAC), precum și transferul eficient al datelor prin protocoale de rețea. În același timp, sistemele de operare în timp real, cum este FreeRTOS, asigură o gestionare optimă a sarcinilor și o sincronizare precisă a proceselor.

Importanța acestei aplicații derivă din potențialul său de a oferi o alternativă flexibilă și economică la sistemele comerciale de achiziție de date, adesea costisitoare și greu de adaptat cerințelor specifice. Arhitectura propusă se distinge prin modularitate, scalabilitate și ușurință în adaptare la diverse contexte experimentale, de la laboratoare de măsurare și control până la medii industriale și prototipuri de cercetare. În plus, posibilitatea extinderii sistemului către aplicații distribuite conferă soluției un caracter evolutiv, aliniat tendințelor actuale din domeniul automatizării și al analizei inteligente a datelor.

Realizând o platformă întru totul transparentă, ce nu depinde de natura semnalului transmis dar nici de protocoul acestuia în cazul în care acesta este digital, se poate realiza o comunicație versatilă, scalabilă, ce poate fi utilizată într-o multitudine de aplicații practice. Sistemul își propune achiziția semnalului și discretizarea acestuia cu ajutorul unui convertor

analog-numeric, pentru a putea fi procesat ulterior și transmis printr-o modalitate flexibilă, optându-se pentru împachetare în pachete UDP, prin intermediul comunicației wireless, prin intermediul protocolului IEEE 802.11. Astfel, acesta poate fi reprodus ulterior cu ajutorul unui convertor numeric-analogic, realizând astfel o conexiune virtuală între sursa semnalului și destinație (Fig. 1).



Fig. 1. Diagramă conceptuală a soluției propuse

Prin această abordare, se propune un cadru tehnologic care îmbină performanța microcontrolerelor moderne cu rigurozitatea metodelor de achiziție analogică, contribuind la consolidarea infrastructurii necesare pentru dezvoltarea generației următoare de sisteme de măsurare, control și diagnosticare inteligentă.

2. STADIU ACTUAL

Dezvoltarea sistemelor de achiziție și transmitere a semnalelor a evoluat semnificativ în ultimele decenii, pe fondul miniaturizării componentelor electronice și al creșterii cerințelor privind conectivitatea și eficiența energetică. Platformele moderne integrează microcontrolere performante, convertoare analog-digitale de mare viteză și interfețe de comunicație eficiente, transformând sistemele de achiziție din soluții centralizate și rigide în structuri modulare și scalabile. În același timp, cercetarea științifică s-a orientat către optimizarea procesului de transmitere a datelor, în special prin tehnici wireless adaptate pentru aplicații medicale, industriale și IoT.

În literatura recentă, preponderent cea străină, numeroase studii abordează integrarea senzorilor wireless în sisteme dinamice, unde implementarea prin conexiuni cablate este dificilă. Un exemplu relevant este lucrarea „Wireless, Fully Soft, Pressure and Temperature Sensors for Sensitive and Robust Diabetic Foot Ulcer Monitoring” [2], care propune un sistem complet flexibil de monitorizare a ulcerelor diabetice. Acesta demonstrează avantajele tehnologiilor pasive și flexibile pentru aplicații medicale, dar și limitările asociate cu complexitatea calibrării, sensibilitatea la interferențe și dificultatea scalării industriale. Deși promițătoare, aceste soluții sunt dificil de aplicat pe scară largă subliniază necesitatea unui sistem fiabil, flexibil și scalabil, după cum este menționat și într-unul din articolele citate: ”[...] there is a critical need for the development of wireless, wearable sensors [...]” [2]. Utilizarea tehnologiilor consacrate, cum ar fi Bluetooth Low Energy (BLE) sau UDP, în locul unor abordări mai complexe și mai greu de implementat pe scară largă, este o alegere strategică, care optimizează performanța și reduce costurile

O altă direcție notabilă este integrarea tehnologiilor Bluetooth Low Energy (BLE) în aplicații biomedicale și de cercetare, cum ar fi proiectul „Implementation of Wireless Bluetooth Signal Transmission into a Wearable Sensor Frontend for Bioelectrical Signals” [3]. Acesta demonstrează transmiterea în timp real a semnalelor bioelectrice prin BLE, cu latență scăzută și eficiență energetică ridicată. Avantajele standardelor Bluetooth constau în scalabilitatea ridicată, interoperabilitatea cu dispozitive comerciale și fiabilitatea dovedită în medii complexe, ceea ce le face soluții potrivite pentru aplicații portabile și industriale, spre deosebire de tehnologiile experimentale mai fragile precum PT/PTX [3].

Alte lucrări, precum „Eco-Conscious Approach to Wireless Gas Monitoring with a Hybrid Printed Passive Sensor Tag” [4], explorează direcții sustenabile, utilizând senzori NFC pasivi imprimați pe materiale biodegradabile. Aceste abordări oferă un impact redus asupra mediului și o independență energetică atractivă, dar sunt limitate la distanțe scurte de comunicație, ceea ce le restrânge aplicabilitatea în sisteme distribuite. În contrast, comunicațiile optice, analizate în studii precum „Optical Wireless Communication Systems: A Survey” [5] și „Application Analysis of Indoor Visible Light Communication System” [6], promit viteze de transfer excepționale, dar sunt afectate sever de interferențele luminoase și de necesitatea vizibilității directe între emițător și receptor, ceea ce le limitează la medii controlate.

În ceea ce privește standardele consacrate pentru rețele de senzori, implementări precum cea descrisă în „An Implementation of a Wireless Sensor Network Based on IEEE 1451.0 and 1451.5-6LoWPAN Standards” [7] demonstrează eficiența protocoalelor de comunicație cu consum redus, precum LoWPAN, în transferul de date în rețele dense și eficiente energetic. În același sens, studiile asupra performanței protocolului UDP, precum „Design and Implementation of UDP Transfer in Sensor Measurement System” [8] și „Performance Analysis of a Communication Interface for Control and Data Visualization of Power Converters” [9], subliniază

avantajele acestuia în aplicații de timp real, unde viteza și simplitatea implementării sunt prioritare.

Analiza literaturii și a soluțiilor existente evidențiază o evoluție consistentă a sistemelor de achiziție și transmisie de date, însă și o serie de limitări recurente, precum lipsa modularității, dificultatea integrării hardware-software și absența unui mecanism complet de reproducere a semnalului achiziționat. Majoritatea implementărilor se concentrează fie pe achiziția, fie pe transmiterea datelor, fără a oferi o arhitectură unificată care să integreze procesele de conversie, procesare și redare în timp real. În acest context, devine necesară o abordare care să combine performanța microcontrolerelor moderne cu flexibilitatea interfețelor de comunicație și cu o arhitectură software deterministă, capabilă să asigure coerență și precizie în întregul lanț de achiziție. Acest gol conceptual și practic reprezintă punctul de plecare al cercetării prezente, care își propune dezvoltarea unui sistem compact, scalabil și autonom de achiziție și procesare a semnalelor, adaptat cerințelor actuale ale mediilor industriale și experimentale.

3. FUNDAMENTE TEORETICE

Proiectarea unui sistem tehnic complex presupune o înțelegere riguroasă a fundamentelor teoretice care guvernează funcționarea sa. Teoria oferă cadrul conceptual ce permite definirea limitelor de performanță, anticiparea comportamentului sistemului și identificarea optimă a parametrilor de proiectare. În absența acestei baze, procesul de implementare devine empiric, predispus la erori și ineficiență. Un sistem bine proiectat trebuie să fie întemeiat pe modele fizice și electronice solide, care să ghideze toate etapele — de la concepție și simulare până la testare și validare experimentală.

Transmisia semnalelor reprezintă o componentă fundamentală în orice sistem de achiziție, iar caracteristicile de propagare ale acestora determină natura și complexitatea arhitecturii. Frecvențele joase, deși ușor de generat și de procesat, implică lungimi de undă mari și, implicit, antene de dimensiuni impracticabile, în timp ce frecvențele înalte oferă o propagare eficientă și o atenuare redusă. Pentru a facilita transmiterea, semnalele utile sunt modulate pe purtătoare sinusoidale de frecvență ridicată, folosind tehnici precum modulația în amplitudine (AM), frecvență (FM) sau fază (PM). Aceste metode permit codificarea informației într-o formă adaptată mediului de propagare, fiecare având avantaje distincte privind fidelitatea, eficiența spectrală și rezistența la zgomot. Variantele digitale ale acestor tehnici — ASK, FSK și PSK — extind principiile modulației clasice în domeniul comunicațiilor moderne, asigurând o transmitere robustă a informației binare.

Cu toate acestea, abordările analogice, deși tradițional fundamentale, implică o complexitate ridicată în proiectare și o sensibilitate crescută la variațiile de parametri ai componentelor. În contrast, soluțiile digitale au devenit preferate datorită stabilității, reproductibilității și interoperabilității oferite. Comunicarea digitală se bazează pe discretizarea semnalelor, proces ce presupune eșantionarea și cuantizarea acestora. Eșantionarea transformă semnalul continuu într-o succesiune de valori discrete în timp, conform teoremei lui Nyquist-Shannon, care stabilește că un semnal poate fi reconstruit fidel dacă este eșantionat cu o frecvență cel puțin dublă față de componenta sa spectrală maximă. Astfel că, o tensiune:

$$U \in [0, U_{ref}), U_{ref} > 0$$

Poate fi reprezentată prin seria discretă:

$$U = U_{ref} \sum_{i=1}^{\infty} 2^{-i} b_i, \quad b_i \in \{0,1\}$$

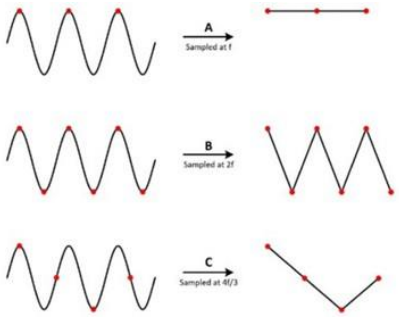


Fig. 2. Exemplificare a importanței teoremei Nyquist-Shannon [10]

Cuantizarea, la rândul său, discretizează amplitudinea semnalului prin maparea valorilor continue pe un set finit de nivele, definite de rezoluția sistemului de conversie. Această etapă introduce o eroare inerentă, eroarea de cuantizare, a cărei magnitudine depinde invers de numărul de biți disponibili pentru reprezentare.

Implementarea practică a acestor procese este realizată prin convertoare analog-digitale (ADC) și digital-analogice (DAC). Convertoarele ADC transformă semnalele continue în forme numerice discrete, permițând prelucrarea lor în medii digitale. Cele mai utilizate sunt convertoarele cu aproximări succesive (SAR), bazate pe un algoritm de căutare binară care determină progresiv codul digital

corespunzător unei tensiuni analogice de intrare. Acestea oferă un echilibru optim între viteză, rezoluție și consum energetic, fiind ideale pentru sisteme embedded și aplicații industriale. Pe de altă parte, convertoarele DAC realizează operația inversă, reconstruind semnale analogice din date digitale. O arhitectură clasică și eficientă este rețeaua rezistivă de tip R-2R, apreciată pentru precizia, linearitatea și simplitatea sa de implementare.

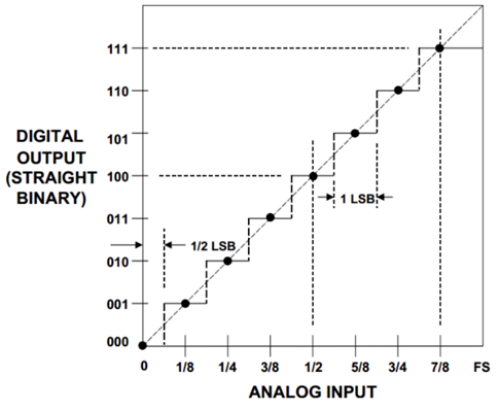


Fig. 3. Funcția de cuantizare a unui ADC unipolar pe trei biți [11]

Performanța generală a unui sistem de achiziție digitală depinde de calitatea acestor convertoare și de modul în care sunt integrate în arhitectura electronică. Parametri precum rezoluția, rata de eșantionare, raportul semnal-zgomot (SNR), numărul efectiv de biți (ENOB) sau erorile de neliniaritate definesc fidelitatea conversiei și, implicit, acuratețea întregului proces de achiziție. Alegerea componentelor trebuie să țină cont de compromisul inevitabil dintre precizie, viteză și consum energetic, astfel încât sistemul final să satisfacă simultan cerințele de performanță și constrângerile hardware.

Astfel, fundamentele teoretice prezentate stabilesc principiile care ghidează proiectarea și implementarea unei arhitecturi de achiziție digitală moderne. Înțelegerea aprofundată a acestor procese — de la modularea și discretizarea semnalelor până la conversia și reconstrucția acestora — constituie fundamentul pe care se construiește întregul proiect, asigurând coerență, predictibilitate și stabilitate funcțională în realizarea sistemului propus.

4. IMPLEMENTARE

Etapa de implementare a constituit punctul de cotitură al proiectului, transformând fundamentele teoretice și analiza conceptuală într-o realizare practică funcțională. Scopul principal al primei iterații a soluției, prezentată în această lucrare, a fost validarea principiului de funcționare al sistemului propus, confirmarea fezabilității arhitecturii alese și evaluarea comportamentului în condiții reale de lucru. Departe de a fi un simplu exercițiu experimental, această etapă a fost gândită ca o demonstrație concretă a conceptului, capabilă să furnizeze date relevante pentru rafinarea ulterioară a proiectului.

Într-o primă fază, accentul a fost pus pe stabilirea fluxului fundamental de achiziție–procesare–transmisie–reproducere, fără a include elemente avansate de configurabilitate sau optimizări hardware. Obiectivul era obținerea unei versiuni de bază, suficient de stabile pentru a permite testarea ipotezelor de proiectare și evaluarea performanțelor teoretice în raport cu rezultatele practice. Această strategie incrementală a permis reducerea riscurilor de implementare și izolarea rapidă a eventualelor deficiențe de proiect.

Selectarea componentelor pentru această primă versiune a fost dictată de echilibrul dintre simplitate, disponibilitate și cost. Întrucât scopul era demonstrarea conceptului, nu performanța absolută, s-au ales componente fiabile, mature tehnologic și bine documentate. Alegerea a fost ghidată, totodată, de compatibilitatea hardware și software dintre module, evitându-se soluțiile complexe care ar fi introdus incertitudini inutile în faza inițială de testare.

Elementul central al sistemului a fost microcontrolerul ESP8266, dezvoltat de compania Espressif Systems, recunoscut pentru versatilitatea și integrarea completă a funcționalităților Wi-Fi. Acest SoC, bazat pe o arhitectură de 32 de biți, oferă o frecvență de tact de până la 160 MHz, memorie SRAM internă, interfețe SPI și UART, și un canal ADC de 10 biți, fiind ideal pentru aplicații embedded cu cerințe moderate de procesare și conectivitate wireless [12]. Maturitatea platformei, ecosistemul software vast (SDK-uri, multiple biblioteci disponibile, suport FreeRTOS) și comunitatea activă de dezvoltatori au făcut din ESP8266 o alegere strategică pentru o primă implementare fiabilă.

Din punct de vedere constructiv, platforma WeMOS D1 Mini Pro a fost utilizată ca referință pentru designul hardware. Această placă oferă un format compact, cu memorie flash extinsă de 16 MB și conectivitate directă prin interfețele standard ale microcontrolerului [13]. Deși placa nu a fost folosită integral în prima versiune a proiectului, schema electrică și layout-ul său au servit drept bază pentru proiectarea propriului modul, permițând integrarea rapidă a componentelor și reducerea timpului de dezvoltare.

Pentru achiziția semnalului analogic, s-a optat pentru convertorul AD7992 de la Analog Devices, un ADC SAR cu rezoluție de 12 biți și două canale analogice [14]. Alegerea acestuia a fost motivată de compatibilitatea cu interfața I²C și de consumul energetic redus, aspecte esențiale pentru un sistem embedded autonom.

Chiar dacă ESP8266 nu dispune de suport hardware dedicat pentru I²C, emularea software a protocolului a fost suficientă pentru validarea principiului de funcționare. Rata de transfer limitată la 100 kHz a condus la o frecvență de eșantionare de aproximativ 5,8 kHz, valoare care, deși modestă, a fost suficientă pentru testarea integrității lanțului de achiziție și transmisie.

Analiza performanței acestui subsistem a evidențiat însă o serie de limitări inerente: dependența puternică de latența magistralei, sensibilitatea la zgomotul indus pe liniile I²C și absența unui buffer intern de eșantioane.

Cu toate acestea, pentru scopul acestei etape – confirmarea achiziției și conversiei corecte a semnalului – performanțele obținute s-au dovedit satisfăcătoare, validând conceptul de arhitectură modulară propus.

Pentru procesul invers, de conversie digital-analogică, s-a utilizat convertorul DAC121C085 de la Microchip, un DAC dual pe 12 biți cu interfață I²C [15], capabil să redea semnalul discretizat într-o formă analogică de fidelitate acceptabilă. Alegerea acestei componente s-a datorat raportului excelent între precizie, cost și ușurință de integrare, precum și compatibilității native cu interfața I²C a ESP8266. DAC-ul a fost conectat la un etaj de ieșire simplificat, destinat exclusiv validării semnalului reconstruit.

Pentru a reduce costurile și complexitatea, circuitul de condiționare a semnalului nu a fost implementat integral în această iterație. În locul unei etape dedicate de adaptare a semnalului bipolar, s-a lucrat exclusiv cu semnale unipolare, ajustând domeniul de amplitudine la specificațiile convertoarelor. Această simplificare a permis testarea rapidă a fluxului complet de achiziție–transmisie, urmând ca în iterația ulterioară să se introducă etajele analogice de protecție și amplificare diferențială.

Comunicarea între module a fost realizată printr-o conexiune Wi-Fi locală, folosind un protocol minimalist bazat pe UDP, implementat direct în firmware. Alegerea UDP s-a datorat latenței scăzute și structurii simple a pachetelor, potrivită pentru un flux continuu de date în timp real. Deși protocolul nu asigură corectarea erorilor, în contextul unei conexiuni stabile și a unei distanțe reduse între emițător și receptor, acesta a permis o transmisie fluentă și o reconstrucție fidelă a semnalului.

La nivel software, programul de control a fost implementat în mediul PlatformIO, utilizând bibliotecile native pentru ESP8266. Codul a fost structurat modular, cu funcții dedicate pentru achiziție, împachetare, transmisie și conversie. În paralel, s-au efectuat teste de stabilitate a conexiunii și măsurători de latență între pachetele succesive, pentru a evalua consistența transferului de date în regim continuu.

5. REZULTATE

Rezultatele practice ale acestei prime versiuni au confirmat viabilitatea conceptului. Sistemul a reușit să preia un semnal analogic simplu, să-l convertească în format digital, să-l transmită prin rețea și să-l reconstruiască în partea de recepție cu o fidelitate vizibilă. Deși distorsiunile au fost sesizabile la frecvențe apropiate de limita de eșantionare, forma generală a semnalului a fost corect reprodusă, demonstrând funcționarea coerentă a întregului lanț. În paralel, s-au observat o serie de aspecte care au necesitat îmbunătățiri în perspectiva unei versiuni ulterioare. În special, s-a constatat o dependență pronunțată între stabilitatea conexiunii Wi-Fi și alimentarea sistemului, precum și o creștere a zgomotului de fond în etapele de conversie. De asemenea, gestionarea bufferelor de date în memoria limitată a microcontrolerului a reprezentat o provocare, necesitând optimizări suplimentare la nivelul temporizărilor și al prioritizării sarcinilor.

Un alt rezultat valoros al acestei etape a fost experiența acumulată în calibrarea componentelor și în integrarea subsistemelor de achiziție și transmisie. Testele au demonstrat compatibilitatea între convertoare și microcontroler, stabilitatea comunicației fără fir și capacitatea sistemului de a menține un flux de date constant fără pierderi majore. În urma testelor realizate a fost obținută o latență de aproximativ 2.4 ms dintre semnalul inițial (semnal dreptunghiular folosit pentru testare) și semnalul reprodus (Fig. 4).

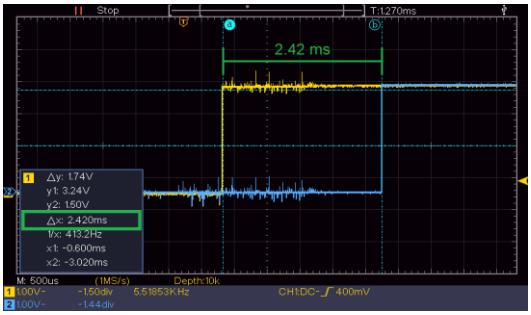


Fig. 4. Captură pe osciloscop pe care se observă latența dintre semnalul inițial și cel reprodus

6. CONCLUZII

Pe baza datelor obținute, s-a conturat o imagine clară asupra direcțiilor de optimizare: introducerea unui circuit de condiționare pentru semnale bipolare, creșterea frecvenței de eșantionare, implementarea unor mijloace de sincronizare pentru gestionarea fluxului și adoptarea unui sistem de operare în timp real (FreeRTOS) pentru distribuția sarcinilor. Aceste concluzii au pregătit terenul pentru cea de-a doua iterație, orientată către performanță și stabilitate pe termen lung. Cu toate acestea, această lucrare dovedește în sine utilitatea soluției propuse și necesitatea unui asemenea sistem, ce ar avea un impact pozitiv asupra mai multor domenii, depășind restricțile actuale și limitările provenite din necesitatea transmiterii, achiziției și procesării unui semnal pentru o anumită aplicație, indiferent de natura acesteia.

BIBILOGRAFIE

[1] Lelutiu, L.M., *Sisteme pentru achiziția și prelucrarea datelor*, Editura Universitații Transilvania din Brașov, ISBN 978-606-19-0304-17, 2018, Brașov România.

[2] X. Li, Z. Ye, M. Yang, M. Liu"*Wireless, fully soft, pressure and temperature sensors for sensitive and robust diabetic foot ulcer monitoring,"* in 2024 IEEE SENSORS, Oct. 2024, pp. 1–4.

[3] L. Joeressen, R. Rieger, *"Implementation of wireless Bluetooth signal transmission into a wearable sensor frontend for bioelectrical signals,"* 2024.

[4] J. Zikulnig, M. H. Malik, L. Rauter, M. Lenzhofer, S. Carrar, and J. Kosel, "*Eco-conscious approach to wireless gas monitoring with a hybrid printed passive sensor tag,"* IEEE Sensors Lett., 2024.

[5] O. Alsulami, A. T. Hussein, M. T. Alresheedi, and J. M. Elmirghani,"*Optical wireless communication systems: A survey,"*arXiv preprint arXiv:1812.11544, 2018.

[6] Y. Zhang, H. N. Wang, Z. X. Cheng, and D. Han,"*Application analysis of indoor visible light communication system*,"J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1852, no. 4, p. 042029, Apr. 2021.

[7] R. Seng, K. B. Lee, and E. Y. Song, *"An implementation of a wireless sensor network based on IEEE 1451.0 and 1451.5–6LoWPAN standards*,"in Proc. 2011 IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf., May 2011, pp. 1–6.

[8] W. Enhuai, L. Yonghong, X. Zhiyong, and Y. Fengying, "*Design and implementation of UDP transfer in sensor measurement system,"*in Proc. 2010 3rd Int. Conf. Comput. Sci. Inf. Technol., vol. 7, Jul. 2010, pp. 310–313.

[9] I. Minakov,"*Performance analysis of a communication interface for control and data visualization of power converters,"*in Proc.2024 Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe), Sep. 2024, pp. 1–6.

[10] "*Acquiring an analog signal: Bandwidth, Nyquist sampling theorem, and aliasing,"* NI, May 30 2025. Available: https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals/analog-fundamentals/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html

[11] W. Kester, Ed., *The Data Conversion Handbook*. Newnes, 2005. (Also published as Analog-Digital Conversion, Analog Devices, Inc., 2004.)

[12] Espressif Systems, ESP8266EX Datasheet, ver. 7.0, 2023.

[13]ESP8266 D1 Mini Pro Wireless Development Board. OptimusDigital.Available: https://www.optimusdigital.ro/en/others/5828-esp8266-d1-mini-pro-wireless-development-board.html. (Accessed: Nov. 24, 2025)

[14] Analog Devices, AD7992: 2-Channel, 12-Bit ADC with I²C-Compatible Interface, 2014.

[15] Texas Instruments, *DAC121C085: 12-bit, low-power, rail-to-rail output DAC with I²C interface*, 2016. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac121c085.pdf

Despre autori

Șef lucr.univ.dr.ing **Laura Mihaela LELUȚIU**
Universitatea „Transilvania" din Brașov, Brașov, România

Autoarea este licențiată în inginerie electrică la Universitatea Transilvania din Brașov, în anul 1990. Începând cu 2003 este lector universitar la Facultatea de Inginerie Electrică și Calculatoare, Universitatea Transilvania din Brașov. Informații suplimentare: membră ICOHTEC - Comitetul internațional de istorie a tehnologiei, membră titulară CRIFST, membră AGIR.

Student Ing. **Andrei Cristian SPĂTARU**
Universitatea „Transilvania", Brașov, România

Autorul este licențiat în inginerie electrică la Universitatea Transilvania din Brașov, în anul 2020 și in prezent student la Master, specializarea Sisteme Electrice Avansate.